Huygens rediscovers Titan

ホイヘンスでタイタンの新たな顔が明らかに

Tobias Owen

土星最大の衛星タイタンに着陸したホイヘンス突入機から送られてきたデータをもとに、さまざまな解析が始められている。そこから、地球に似ているものの、形成初期の段階で凍ってしまい発達が止まった「ピーター・パン」の世界の素顔がみえてくる。

Nature Vol. 438 (756-758) / 8 December 2005

1980年と1981年に2機のボイジャー探査機が太陽系の6番目の惑星、土星のそばを通り過ぎて以来、複雑で変動する磁気圏に包まれた美しいリングと30以上の衛星をもつこの惑星を再び訪れることが強く求められてきた。この要求に応えるべく、NASAとヨーロッパ宇宙機関(ESA)は共同して、1997年10月15日にケプカナベラルから土星探査機カッシーニ・ホイヘンスを打ち上げた。Nature12月8日号では、ホイヘンス突入機による土星最大の衛星タイタンへの大気中降下とそれに続く衛星表面への着地についてのあらましが述べられている¹。さらに、搭載されている6つの計測機器によって得られた最初の成果も掲載されている²⁻⁷。これらのデータは、解析の非常に初期の段階ではあっても、得るところがとて多く、好奇心をそそる謎も生まれている。

この段階に達するには、カッシーニ・ホイヘンス・ミッションはきわめて多くの政治的・技術的な難題を何よりも先に乗り越えなければならなかった。土星探査に必要なハードウェア、つまり周回機と少なくとも1機の大気突入機は1つの宇宙機関のもつ資力を超えており、新しい形の国際協力が求められた。そこでNASAは、土星系全体を調査するためのさまざまな計測機器を搭載するカッシーニ周回機(土星の月のうち4つを発見した天文学者ジョバンニ・ドメニコ・カッシーニにちなんで命名された)を製作し、一方でESAは、タイタンの大気に入り、表面に向かって降下するホイヘンス突入機(タイタンを発見したオランダの物理・天文学者クリスティアーン・ホイヘンスにちなんで命名された)を製作

した。NASAとESA双方の科学者と技術者がプロジェクトのすべての段階に参加し、周回機と突入機の両方に計測機器を提供した。

この大胆な決断は輝かしい成功をおさめ、土星探査機カッシーニ・ホイヘンスは7年間の飛行の後、土星の周回軌道へ投入され、その後2004年12月25日にカッシーニはホイヘンスを放出した。ホイヘンスは2005年1月14日にタイタンの大気に突入、続いてパラシュートを開き、2時間27分かけて衛星表面へと降下した。表面に到着後、カッシーニと地球を結ぶアンテナ網を介して、ホイヘンスはさらに69分間にわたってデータをドイツ・ダルムシュタットにあるヨーロッパ衛星運用管制センターに送信した。これらは、太陽から地球までの距離より10倍も太陽から離れた場所にある、衛星の凍った表面から送られた最初の信号である。そのとき待機していた科学者や技術者の反応は、木星の衛星を発見したときのガリレオの気持ちを想像しようとした際に、ホイヘンス自身が用いた次の言葉でよく表される。「少なからぬ歓喜」。

しかし、なぜタイタンなのか。タイタンは太陽から非常に遠いため、形成のきわめて初期段階で凍結したが、将来太陽が年老いて赤色巨星となりタイタンを融かしてしまうまで、今の状態のままでいるだろう。タイタンは水星よりも大きく、地球よりも10倍も厚い窒素を主とした大気をもつ。それは十分重く、かつ寒冷的な世界である(図1)。きわめて温度が低いため、水は凍ったままで、水蒸気でさえ大気中に存在しない。対照的に、火星、地球、金星などの内惑星はあたたかく、水蒸気に活性があり、炭素化合物は急速に酸化される。

酸素の供給源としての水がないために、タイタンでは数十億年の間、原始的で水素の豊富な状態が続いたと考えられる。炭素を含む主要な気体が二酸化炭素ではなくメタン (CH_4) である、という事実がその証拠である。この大気では、光化学反応によって有機物スモッグの厚い層ができていて、可視光の波長ではタイタンの表面をみることはできない。ホイヘンスに搭載された大気構造測定装置 (HASI) によって測定されたタイタンの表面温度は -179°C であり²、この温度では液体メタンが湖や川として存在すると考えられる。さらに、この風変わりできわめて燃えやすい世界から、地球の形成初期の隠された歴史を明らかにするさまざまな知識が得られる。

タイタン大気の基本的な物理特性は、ホイヘンスが降下している間に、HASI とドップラー風速測定によって計測された。ドップラー風速測定によって、タイタン大気の低空では風がおおむねタイタンの自転方向に吹いており、高度約 120 キロメートルでは秒速 120 メートル (430kmh^{-1}) に達することが確かめられた³。この「スーパーローテーション」は金星大気でもみられ、地球からのタイタン観測と理論モデル⁸ 双方の裏づけとなる。タイタン表面の風は、逆に非常に弱く、秒速約 1 メートル (3.6kmh^{-1}) 以下であることが HASI によってわかった³。この観測結果から提起される難問は、このようなそよ風でもタイタン表面でみられる地形的特徴を説明できるのか、それとも強い突風が必要なのかということである。

ホイヘンスのエアロゾル収集装置・加熱装置 (ACP)⁴ は、降下中にタイタン大気中のエアロゾル、および浮遊する液体粒子や固体粒子を捕獲して加熱し、その排出物はガスクロマトグラフ・質量分析器 (GCMS)⁵ に送られて分析された。最初の分析から得られた証拠により、窒素を含む有機化合物の存在が示されており、これにはアミノ基、イミノ基、ニトリル基が含まれている可能性がある (存在している化合物を正確に確かめるため、さらに進んだ分析が行われている)。このようなエアロゾルは、有機物の雨のようなものとしてタイタン表面に絶えず降り注いでいるはずであり、それは全球を覆う層を作り、層の厚さは 1 キロメートル以上になっていると考えられる⁹。これは、ACP から得られた情報を使って、表面上で生成される可能性のあるさらに別の化合物を予測できることを意味する。おそらく、タイタン表面の赤外線画像にみられる暗い斑は、比較的新しい堆積物だろう¹⁰。この現象によって大気中のメタンが除かれると考えられる。実際、何らかの (まだ見つかっていない) 供給源から連続的にせよ、一時的にせよ供給されなければ、ほんの 1000 万～2000 万年でタイタンの大気からメタンは完全に消失してしまうかもしれない。

図1 地球とタイタンの大気の比較。ホイヘンス突入機の降下によって、土星の衛星タイタンの大気に関する研究が初めて可能になり、地球の大気との驚くほどの類似点とはっきりとした相違点 that 明らかになった。双方の大気は窒素が主だが、タイタンではその温度の低さから、大気中に含まれる炭素を含む気体は二酸化炭素 (345ppm しか存在しない) ではなく、メタン (全体の 1.6%) である。メタンにかかわる光化学反応は大気中層にスモッグを作り、メタン有機物の雨と窒素を含むエアロゾルがタイタン表面に絶え間なく降り注ぎ、広大な河川網でできた地球に似た景観を形成する。放射崩壊によってできたアルゴン (^{40}Ar) は、地球大気ではその 1% を構成するが、タイタンではほとんど存在しない (たったの 43ppm)。始原始的なアルゴン (^{36}Ar) はさらに少なく、大気中の窒素が窒素分子ではなくアンモニアのような化合物の形でもたらされたにちがいないことを示している。

ホイヘンスに搭載されたいくつかの計測機器によって得られた結果から、地球上の水で起きているものと似た相変化サイクルがメタンに影響を与えていると推測される。GCMS と降下カメラ / スペクトル放射計 (DISR)⁶ の両方によって、大気の低高度領域でメタンのもやが検出された。また、地表科学パッケージによって着陸地点の地面は湿った砂と同じぐらいのかたさで、おそらく氷の細片、凝結したエアロゾルおよび少量の液体の混合物でできていることがわかった。この少量の液体は、ホイヘンスが着地した後、GCMS によって検出されたメタンの信号が急に強くなったことから、凝縮したメタンであると同定された。この強いレベルの信号は、残りの 69 分間のカッシーニ周回機との通信中も持続した⁵。

このことから、タイタンの雨は主にメタンであろうと思われる。しかし、風変わりな物質が作り出したという事実にもかかわらず、ホイヘンス着地点近くの景観は地球に非常に似ており、DISR が撮影したすばらしい画像によって、周囲の地形に刻まれた、非常にはっきりとした輪郭をもつ流路系の存在が明らかになった (図2)。メ

タンの雨と表面下の泉が組み合わさって、厚い氷でできた岩盤を削り、このような河川網ができたにちがいない。

大気中に窒素が豊富に存在することは、タイタンと地球に共通したもう1つの特徴である。しかしながら、地球大気中の存在量と比べると、タイタンでは窒素の軽い同位体 ^{14}N が枯渇しており、これはタイタンが形成されてから今までに、現在大気中に存在している量のほぼ5倍が流出したことを示している⁵。(宇宙への流失は、ある種の同位体が選択的に除去される唯一の妥当な経路であり、火星で観測されている¹¹。)メタン中に存在する炭素はこのような異常な同位体比を示していない。これは、タイタンでメタンが継続して補充されていることを示すさらなる証拠である。

メタンが補充されるために考えられる経路の1つには、タイタン内部から物質を放出する低温火山か、またはこれに似たメカニズムがある。タイタン大気中にアルゴンの同位体 ^{40}Ar が発見されたことは、この可能性を裏づけるものである。 ^{40}Ar の起源は放射性カリウムの崩壊だけであり、カリウムは大部分がタイタンの氷と水でできたマントルの下にある岩石中に存在しているはずである。対照的に、始原的な同位体 ^{36}Ar は大気中にごくわずかししか含まれていない。この事実から、タイタン形成時の状況に関する重要な手がかりが得られる。つまり、窒素はアンモニアのような化合物の混合物としてタイタンにもたらされたことを示しているのだ(実際に地球にそれが来たように)。単純な窒素分子 N_2 は 45K (−228°C) 以下の温度では、タイタンを形成した氷の微惑星のようなものにのみ捕獲され、このような温度では

周囲の ^{36}Ar の大部分も捕獲される。もっと高い温度では、アンモニアのような化合物は捕獲されるが、始原的なアルゴンは捕獲されない。

しかし、タイタン大気から失われているのは始原的な希ガスだけではない。厚い窒素大気をもつ世界では、炭素の量はタイタンで実際に見つかっているよりも4~20倍あるはずで、炭素もどこかに隠されているのだ。(この範囲は自然界の他の場所でわかっている割合から算出したもので、最小値は太陽中の存在比から、最大値は彗星と内惑星で見いだされたものである^{12,13}。)地球では、失われた炭素は地殻中の膨大な炭酸塩岩中に見つかっている。タイタンでは、炭素の一部はエアロゾルの太古の堆積物として存在し、かつて次々とタイタンに新しい表面を作った衝突クレーターを隠している氷の層の下に埋もれている可能性がある。しかし、メタンの供給源が必要なことから、炭素の膨大な堆積物がタイタンの深部に、おそらくずっと昔にタイタンのマントル中に作られたメタンの形で、今も隔離されていると思われる。このメタンは、タイタンの地殻の下にあるとされている海の底で、かごのような構造をした水分子(クラスレート・ハイドレートとして知られる形)の中に今は保持されているのかもしれない。あるいは、もともとの形(有機化合物、二酸化炭素、炭素粒)で炭素が保持されている貯蔵庫が表面のはるか下に存在し、そこでは、今なおメタンに転換されているかもしれない⁵。

失われたメタンの謎は解かれるべき多くの問題の1つに過ぎない。ホイヘンスのデータがもたらした豊かな収穫物が解析された後も、タイタンは多くのことを私たちに語ってくれるであろう。ホイヘンスが着地した地域は、かつてヨーロッパ大陸とアメリカ大陸の間にあったと考えられていた架空の島にちなんで「アンティリア」と名づけられた。このシンボルはカッシーニ-ホイヘンス計画の国際的な性格を表し、激しく凍結した初期地球の模倣物に向けて飛び立つ、次なるミッションの刺激となるはずである。

ハワイ大学天文学研究所(米)、Tobias Owen

1. Lebreton, J.-P. et al. *Nature* **438**, 758–764 (2005).
2. Fulchignoni, M. et al. *Nature* **438**, 785–791 (2005).
3. Bird, M. K. et al. *Nature* **438**, 800–802 (2005).
4. Israel, G. et al. *Nature* **438**, 796–799 (2005).
5. Niemann, H. B. et al. *Nature* **438**, 779–784 (2005).
6. Tomasko, M. G. et al. *Nature* **438**, 765–778 (2005).
7. Zarnecki, J. C. et al. *Nature* **438**, 792–795 (2005).
8. Hourdin, F. et al. *Icarus* **117**, 358–374 (1995).
9. Strobel, D. F. *Planet. Space Sci.* **30**, 833–838 (1982).
10. Porco, C. C. et al. *Nature* **434**, 159–168 (2005).
11. McElroy, M. B. et al. *J. Geophys. Res.* **82**, 4379–4388 (1977).
12. Owen, T. & Bar-Nun, A. *Icarus* **116**, 215–226 (1995).
13. Grevesse, N. et al. *EAS Publ. Ser.* **9**, 1 (2005).

ESA/NASA/JPL/UNIV. ARIZONA

図2 メタンの川。ホイヘンス突入機が高度16kmから写したタイタン表面の3枚の連続写真は、1点に集まる河川系を明らかにした。